

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF MASONRY MATERIAL CHARACTERISTICS

J. Novák¹, M. Vokáč²

Summary: *The results obtained from laboratory experiments carried out on various macroscopic blocks of masonry specimens as well as on meso-scopic samples of both phases (brick and mortar) at Klokner institute in Prague are summarized in this work. The mesoscopic samples were prepared with reference to expected numerical simulations, which draw on the existence of the Representative Volume Element (REV) combined with the theory of first order homogenization. The material parameters of individual phases were derived, however, following the Czech or European standards. Estimates of the shear parameters of joints describing the behavior of Interfacial Transition Zone (ITZ) are also presented.*

1. Úvod

Na základě intenzivní snahy o aplikaci sofistikovaných materiálových modelů v nelineární analýze zděných konstrukcí byla v rámci projektu GAČR 103/04/1321 provedena v Kloknerově ústavu v Praze řada experimentů na makroskopických vzorcích zdíva. Experimenty byly provedeny s cílem určit lineární a nelineární parametry jednotlivých zdících komponent (malta, zdíci bloky) a makroskopické (průměrné) vlastnosti zdíva z plných cihel. Zkoušky vlastností cihel a malty jsou prováděny s využitím standardizovaných procedur např. [ČSN EN 1052-3]. Naopak testy makroskopických těles byly sestavovány na základě inženýrských odhadů vycházejících z množství předpokladů o chování konkrétních topologií zdíva.

Snahou řešitelstvého týmu je zahrnout různé vlivy, jakými jsou např. směr ortotropie, směr zatěžování a také technologie vyzdívání, na mechanickou odezvu zděné konstrukce. Dosažené výsledky v podobě diskrétních hodnot a zatěžovcích čar některých veličin slouží zejména jako vstupy a srovnávací data pro počítacové simulace realizované na katedře stavební mechaniky na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

¹ Ing. Jan Novák, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra stavební mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 35 46 06, e-mail: novakj@cml.fsv.cvut.cz

² Ing. Miroslav Vokáč, ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Katedra experimentálních a měřicích metod, Šolínova 7, 166 29 Praha 6, tel. +420 224 35 35 09, e-mail: vokac@klok.cvut.cz

2. Stanovení pracovních diagramů zdiva z makroskopických vzorků

V současné době používané výpočetní procedury kvantifikující odolnost zděných konstrukcí na různé druhy zatížení jsou založeny na schopnosti přenosu tlakového, tahového nebo smykového napětí ve sparách nebo zdíčích blocích. To znamená, že o celkové únosnosti konstrukce rozhoduje pouze mezní tlaková, tahová nebo smyková pevnost pojiva případně zdíčího bloku.

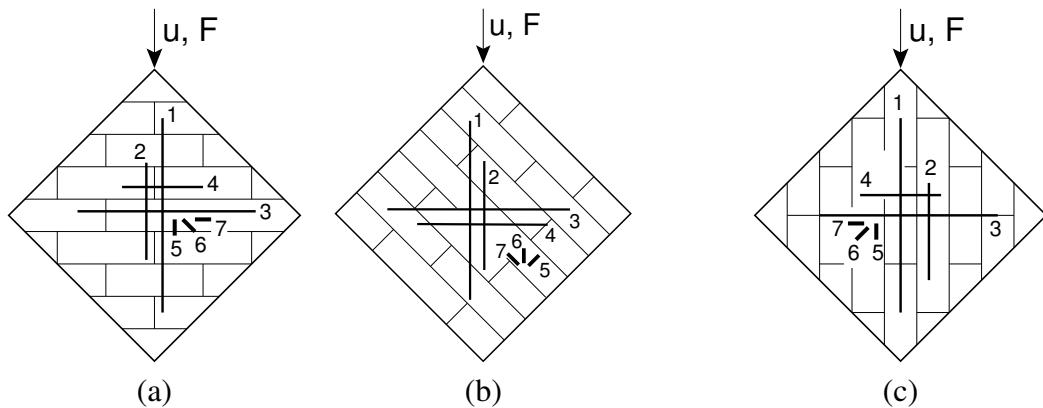
Jedna z hlavních motivací prezentovaného výzkumu je však popis mechanického chování zdiva jako homogenního materiálu, které je poměrným způsobem závislé na chování jednotlivých složek. Pro dosažení co možná nejpřesnějšího výsledku se jeví jako velmi vhodné kombinovat výsledky z experimentů s počítačovými simulacemi.

Aby bylo možné uvažovat zdivo jako homogenní materiál, bylo nutné při konstrukci experimentálních těles vzít v úvahu dostatečně velký objemový vzorek, který ve výsledku dostatečně přesně vystihne chování cihel i spar s ohledem na jejich dimenze. Tento problém je analogií konstrukce reprezentativního objemového elementu (REV - Representative Volume Element) v případě konstrukce Periodické jednotkové buňky (PUC - Periodic Unit Cell) při víceúrovňové analýze kompozitních struktur.

2.1. Příprava experimentálních těles

S ohledem na celkovou velikost těles, jejich hmotnost a na zatěžovací přístroje (tj. hodnota maxima vyvinutého zatížení), které byly při zkouškách používány byly nakonec vyzděny vzorky o velikosti cca 60×60 cm. Zkoušky byly prováděny na několika topologiích, tj. sklonech ložných spar vzhledem ke směru předepsaných posunů.

Poloha potenciometrických snímačů a tenzometrů byla volena v souladu se směry hlavního napětí, tedy se směry nejvyšší svislé a horizontální deformace. Vzorky byly osazeny také tenzometry, které měřily velikosti tzv. mikrostrainů na jedné z cihel umístěné co nejbliže středu prvku. Topologie těles a poloha snímačů je patrná z obr. (1a, 1b, 1c). Vzorky se nechávaly "zrát" minimálně 28 dní.

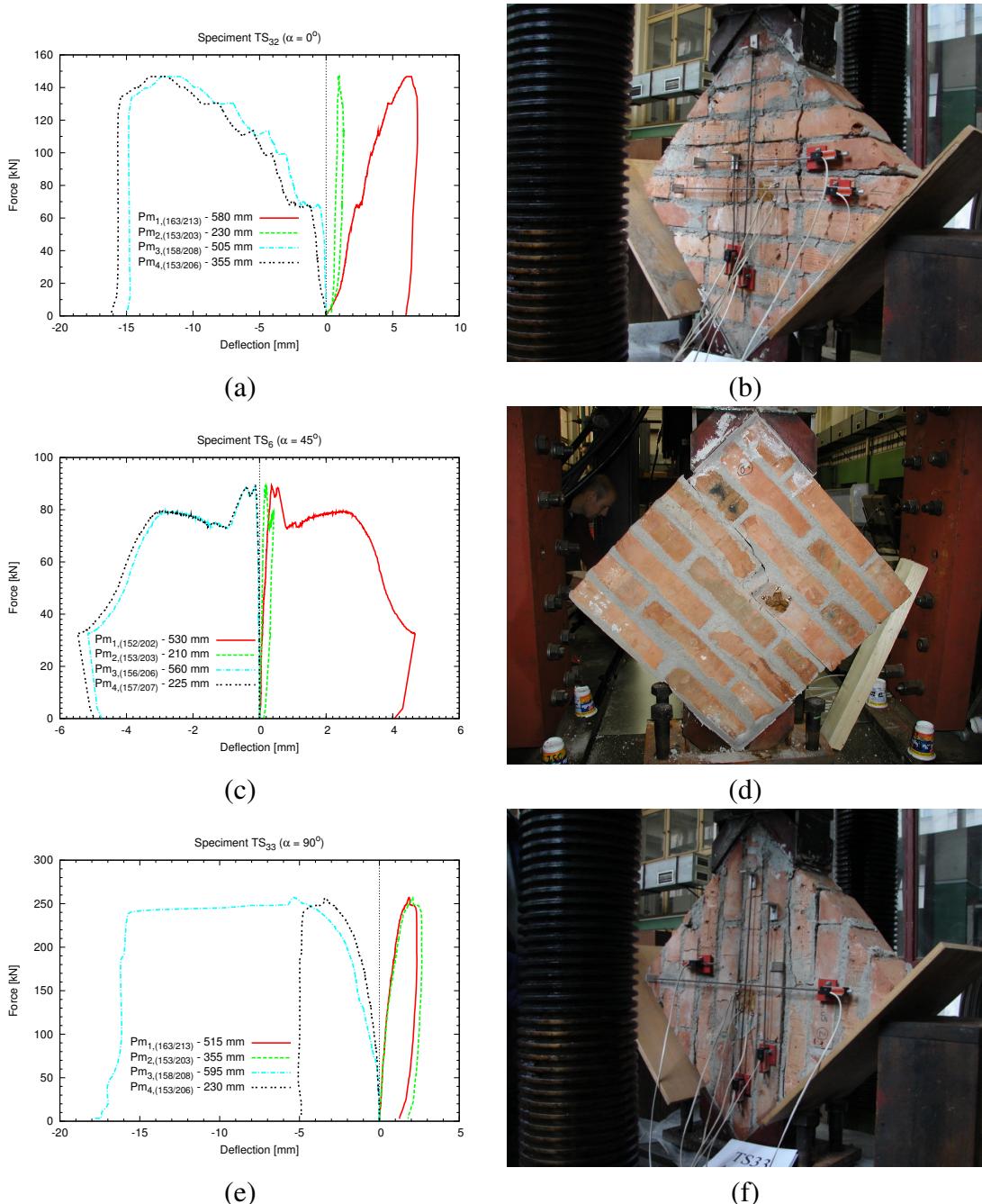


Obrázek 1: a) Sklon ložných spar 0° (makroskopické vzorky TS21, TS 22, TS23, TS32),
b) sklon ložných spar 45° (makroskopické vzorky TS3, TS4, TS5, TS6),
c) sklon ložných spar 90° (makroskopické vzorky TS31, TS33)

Poznámka: V obrázku č. 1 jsou číslicemi 1-4 označeny potenciometrické snímače, a číslicemi 5-7 tenzometry.

2.2. Porušení zkušebních těles a výsledné zatěžovací čáry

V souladu s principem zatěžování těles řízenou deformací jsme obdrželi několik pracovních diagramů (zatěžovacích čar) zobrazujících závislost posunutí kontaktních bodů jednotlivých snímačů na velikosti síly vyvozené příslušným posunem zatěžovacího lisu. Tyto zatěžovací čáry byly zkonstruovány pro každý experiment ve třech sériích, přičemž jejich ilustrativní příklady jsou patrné z obr. (2).



Obrázek 2: Ukázka zatěžovacích čar a výsledného porušení některých vzorků

Pracovní diagramy z obr. (2a, 2c, 2e) je nyní možné porovnat s odpovídajícími zatěžovacími čarami zkonstruovanými z numerických simulací pro odpovídající vzorek příslušné série. Geometrie tělesa zahrnující rozložení obou fází je do numerických simulací získávána z digitálních

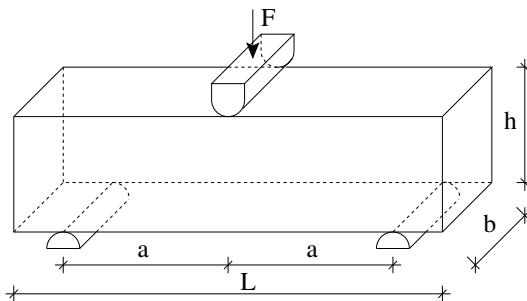
fotografií. Z obr. (2b, 2d, 2f) je patrný průběh trhlin na konci zatěžování, který sleduje směr hlavních napětí. S využitím hodnot microstrainů zaznamenávaných tenzometry lze s výsledky z numerických simulací porovnávat redistribuci napětí po zdícím prvku, která je ovlivněna geometrickým uspořádáním cihel ve zdivu.

3. Odvození materiálových charakteristik malty a cihel

Jako vstupy pro numerické simulace prováděné na mezo-úrovni bylo nutné provést zkoušky mechanicko-fyzikálních parametrů obou složek (malta, cihelný střep). Jako o třetí materiálové fázi lze hovořit o fázovém rozhraní mezi maltou a zdícím blokem tzv. Interfacial Transition Zone (ITZ). Mechanické chování tohoto kontaktního rozhraní lze výstižně popsat Mohr-Coulombovou podmínkou plasticity. Pro určení úhlu vnitřního tření a soudržnosti spáry byla provedena série smykových zkoušek, které doporučuje nově připravovaná norma [ČSN EN 1052-3].

3.1. Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu byla určena v tahu za ohybu za předpokladu lineárního rozdělení napětí po průřezu zkušebního trámečku s křehkým porušením.



Obrázek 3: Schéma zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

Pro sérii vzorků vyzdívanou z jedné dávky malty bylo vyrobeno vždy po třech zkušebních tělesech (obr. 3). Rozměry trámečku a rozteče mezi silou a podporami byly následující: $a = 50$ mm, $L = 160$ mm, $b = h = 40$ mm.

Testované cihly byly odebrány z jedné palety, přičemž zkoušky byly provedeny vždy na celé cihle, tj. rozměry vzorku byly cca.: $a = 120$ mm, $L = 290$ mm, $b = 65$ mm, $h = 140$ mm.

Hodnoty pevností v tahu byly určeny z výrazu

$$f_t = \frac{3Fa}{b h^2} , \quad (1)$$

kde geometrické veličiny F , a , b , h jsou patrné z (obr. 3).

Výsledná hodnota pevnosti v tahu byla určena aritmetickým průměrem ze všech dílčích hodnot zjištěných v rámci jedné série.

3.2. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku jednoho vzorku malty byla zkoušena vždy na dvou polovinách zkušebního tělesa získaných po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Obě poloviny trámečku byly rozdrrceny v tlaku mezi dvěma protisobě ležícími ocelovými roznášecími destičkami (obr. 4). Výsledná

hodnota f_c pro jeden trámeček malty byla vypočítána aritmetickým průměrem hodnot získaných z obou polovin podle

$$f_c = \frac{1}{2}(f_{c,1} + f_{c,2}), \text{ kde } f_{c,i} = \frac{F_i}{a^2}, i = 1, 2, \quad (2)$$

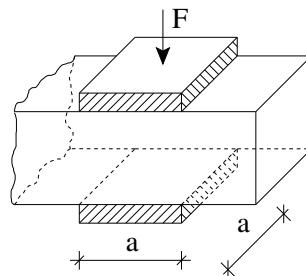
kde f_c je průměrná pevnost v tlaku, $f_{c,i}$ je dílčí hodnota odpovídající jedné polovině zkušebního trámečku. Veličiny F a a jsou patrné z (obr. 4).

U cihel byl zvolen odlišný postup. Dvě poloviny jednoho zkušebního tělesa ze zkoušky v tahu za ohyby nebyly drceny čelistmi o rozmeru $a \times a$ ale celé poloviny byly rozdrceny v lisu. Hodnota pevnosti v tlaku získaná ze dvou polovin jedné cihly je pak

$$f_c = \frac{F_1 + F_2}{A}, \quad (3)$$

kde F_i jsou maximální hodnoty tlakové síly pro i-tou polovinu zkušebního tělesa z pevnosti v tahu za ohybu, $A = 290 \times 140$ představuje plochu cihly, $i = 1, 2$.

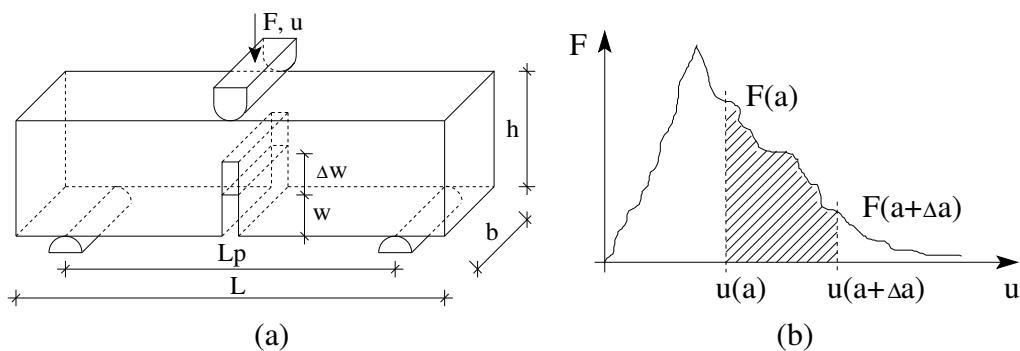
Konečná hodnota f_c vstupující do počítačových simulací byla stejně v jako v případě pevnosti v tahu a všech dalších následujících veličin určena jako aritmetický průměr zahrnující dílčí výsledky celé série.



Obrázek 4: Schéma zkoušky pevnosti v tlaku - malta

3.3. Lomová energie

Jedním z nejdůležitějších parametrů popisující nelineární chování kvazikřehkých materiálů je lomová energie, jejíž hodnota ovlivňuje rychlosť šíření trhlin v závislosti na dosažené úrovni deformace potažmo napětí v konstrukci.



Obrázek 5: a) Schéma zkoušky lomové energie, b) zatěžovací čára

Ozn. vzorku	f_t [MPa]	f_c [MPa]
4/1	2,24	13,2
4/2,9	2,67	12,9
4/3	2,12	12,2
5/1	1,63	15,8
5/2	1,00	7,1
5/3	1,14	9,2
6/1	2,13	15,0
6/2	2,12	16,2
6/3	2,11	18,3
1	1,65	10,0
2	2,49	13,0
3	0,67	8,3
4	1,80	14,4
Průměr	1,83	12,74

Tabulka 1: Pevnost v tlaku a v tahu cihelných vzorků (platné pro všechna makroskopická tělesa)

Ozn. vzorku	f_t [kPa]	f_c [kPa]
1	354	1216
2	308	1090
3	287	1159
Průměr	316	1155

Tabulka 2: Pevnost malty v tlaku a v tahu příslušející makroskopickým vzorkům TS3 - TS6 se sklonem spar 45° , zkoušeno 2.6.2005

Existují dva základní postupy jak určit lomovou energii materiálu. Prvním z nich je výpočet přírůstkové lomové houževnatosti dle předpisu

$$G_f = \frac{\int_{u(a)}^{(a+\Delta a)} F(u)du}{\Delta w}. \quad (4)$$

Druhý, v našem případě výhradně používaný způsob je určení průměrné lomové energie, a to ze vzorce

$$G_f = \frac{\int F(u)du}{b(h-w)}. \quad (5)$$

Pro oba vztahy je význam použitých symbolů patrný z (obr. 5a, 5b).

V sérii zkoušek bylo rozlámáno několik vzorků. Ty se lišily hloubkou zářezu predisponujícího místo lokalizované trhliny. Rozměry maltových těles byly, $b = h = 70$ mm, $L = 300$ mm, se dvěma rozdílnými hloubkami zářezu 5 a 30 mm. Délka L_p byla volena v závislosti na pevnosti malty buď 150 mm, pro maltu s nižší pevností, nebo 200 mm pro maltu pevnější. V případě určení lomové energie cihel byly použity stejně jako u zkoušky v tahu za ohybu célé cihly s třemi hloubkami zářezu 10, 20 a 60 mm s délkou $L_p = 200$ mm.

Ozn. vzorku	f_t [kPa]	f_c [kPa]
1	142	858
2	146	947
3	145	946
Průměr	144	917

Tabulka 3: Pevnost malty v tlaku a v tahu příslušející makroskopickým vzorkům TS3 - TS6 se sklonem spar 45° , zkoušeno 6.1.2006

Ozn. vzorku	w [mm]	G_f [Nm^{-1}]	\bar{G}_f [Nm^{-1}]
1/10	9,3	179	
2/10*	7,4	146	
3/10	7,7	115	147,3
1/60	60,3	82	
2/60	59,7	84	
3/60	60,1	81	82,5
1/H	22,8	32	
2/H	22,4	71	
3/H	22,4	58	
4/H	22,6	48	52,2

*porušení mimo vrub, není zahrnuto v průměru

Tabulka 4: Hodnoty lomové houževnatosti plných cihel v závislosti na délce vrubu

3.4. Modul pružnosti

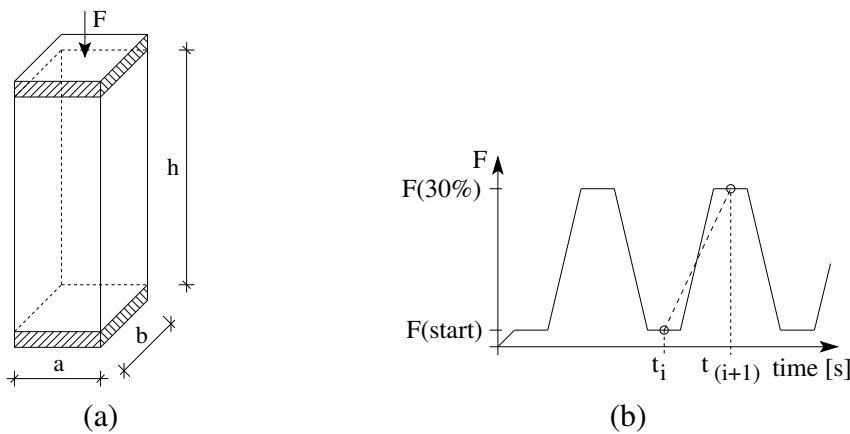
Modul pružnosti byl zjišťován podle zatěžovacího schematu naznačeného na (obr. 6a) s rozměry testovaného trámečku: pro cihly 65 x 65 x 280 mm a pro maltu 70 x 70 x 300 mm. Délka báze extenzometrických snímačů byla v obou případech 150 mm. Modul pružnosti jednoho tělesa byl získán z opakování napínání a odlehčování vzorku viz. (obr. 6b) jako

$$E = \frac{1}{A} \cdot \frac{F_{(30\%)} - F_{(start)}}{\varepsilon(t_i) - \varepsilon(t_{i-1})}, \quad (6)$$

kde $i = 4$ je počet zatěžovacích cyklů a $\varepsilon(t_i)$ je deformace mezi břity polovodičových extenzometrů v čase t_i .

Ozn. vzorku	w [mm]	G_f [Nm^{-1}]	\bar{G}_f [Nm^{-1}]
1	32,0	14,9	
2	32,3	22,9	
3	34,2	17,0	16,0
1'	4,3	23,9	
2'	4,4	45,0	
3'	4,5	46,7	38,5

Tabulka 5: Hodnoty lomové houževnatosti malty v závislosti na délce vrubu (platné pro tělesa TS3 - TS6)



Obrázek 6: a) Schéma zkoušky modulu pružnosti, b) graf cyklického zatěžování

Ozn. vzorku	E [GPa]
E_1	4,91
E_2	4,62
E_3	5,59

Tabulka 6: Hodnoty modulů pružnosti malty pro makroskopická tělesa TS21 - TS23

Ozn. vzorku	E [GPa]
E_1	-
E_2	4,33
E_3	4,07

Tabulka 7: Hodnoty modulů pružnosti malty pro makroskopická tělesa TS31 - TS33

4. Smykové parametry spáry

Na chování zdiva má rozhodující vliv soudržnost pojiva a zdíčího bloku, v našem případě tedy plně cihly. Tato soudržnost je kvantifikována únosností spáry ve smyku, která je zkoučena podle

Ozn. vzorku	E [GPa]
E_1	3,71
E_2	4,14
E_3	3,26

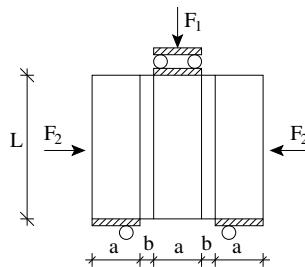
Tabulka 8: Hodnoty modulů pružnosti malty pro makroskopická tělesa TS3 - TS6

Ozn. vzorku	E [GPa]
E_1	-
E_2	8,02
E_3	8,49

Tabulka 9: Hodnoty modulů pružnosti cihel pro všechna tělesa

[ČSN EN 1052-3]. Její mechanické chování na mezi plastického přetváření je pro numerické výpočty zpravidla popisováno Mohr-coulombovou podmínkou plasticity, jejíž průběh jsme schopni spolehlivě určit právě ze zkoušek předepsaných výše citovanou normou.

V našem konkrétním případě bylo otestováno šest sérií obsahujících vždy po třech zkušebních tělesech. Jednotlivé série se od sebe lišily technologií zdění, a to s ohledem na množství vody v cihlách a intenzitu bočního tlaku daného silu F_2 viz. (obr. 7). Jelikož veškeré výsledky mají mimo jiné napomoci zpřesnění připravované normy pro zděné konstrukce, nebylo účelové zjišťovat, pro konkrétní předpis technologie vyzdívání, přesný obsah vody v cihlách, ale její množství bylo určováno dobou smáčení vzorku ve vodě. Jedna skupina těles byla vyzděna z cihel ponořených na 1 hodinu a druhá z cihel smáčených 24 hodin.



Obrázek 7: a) Schéma zkoušky smykových parametrů spáry

5. Závěr a budoucí práce

Experimentálně zjištěné materiálové parametry slouží v současné době jako vstupní a srovnávací hodnoty pro numerické simulace, které jsou realizovány na katedře stavební mechaniky Fakulty stavební ČVUT v Praze. Výsledky získané z kombinace obou přístupů mají ověřit efektivní použitelnost víceúrovňového přístupu v případě analýzy mechanické odezvy zdíva. Dosud provedené laboratorní i numerické experimenty prokazují, že tento postup je plně použitelný jak ve standardních podmínkách (konstrukce běžné inženýrské praxe), tak i v podmínkách extrémních, jako jsou například historické zděné stavby (sakrální, a šlechtické monumenty).

F_2 [kN]	F_1 [kN]	σ [MPa]	τ [MPa]
8	29,4	0,197	0,362
8	28,6	0,197	0,352
8	34,6	0,197	0,426
24	47,4	0,591	0,584
24	54,9	0,591	0,676
24	61,5	0,591	0,757
40	67,3	0,985	0,829
40	69,3	0,985	0,853
40	93,2	0,985	1,148

Tabulka 10: Hodnoty smykové únsonosti spáry v závislosti na bočním předpětí (doba smáčení cihel 1 h)

F_2 [kN]	F_1 [kN]	σ [MPa]	τ [MPa]
8	34	0,197	0,419
8	30,5	0,197	0,376
8	24,7	0,197	0,304
24	47,6	0,591	0,586
24	64,4	0,591	0,793
24	50,9	0,591	0,627
40	67,7	0,985	0,834
40	62,68	0,985	0,772
40	62	0,985	0,764

Tabulka 11: Hodnoty smykové únsonosti spáry v závislosti na bočním předpětí (doba smáčení cihel 24 h)

Již dokončené srovnávací výpočty dokazují, že je třeba klást další důraz na odhad materiálových veličin popisujících mechanické chování spár. Ukazuje se totiž, že jsou tyto parametry ovlivněny množstvím vnějších jevů od technologie zdění počínaje a vlhkostními nebo napjatostními poměry (předepnutí zkušebního vzorku v době zrání) v čerstvém zdivu konče.

6. Poděkování

Tento příspěvěk byl získán za finančního přispění MŠMT ČR, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS, a částečně také za finančního přispění projektu GAČR 103/04/1321.

7. Literatura

[ČSN EN 1052-3] 5/2002: *Zkušební metody pro zdivo - Část 3: Stanovení počáteční pevnosti ve smyku*, CNI, Praha.

[Bílek and Keršner] Bílek and Keršner (eds) 2005: *2nd International Symposium NON-TRADITIONAL CEMENT & CONCRETE: Books of Proceedings*, Brno.